

# Análise de Curto Circuito e Estabilidade

Bruno Zwierewicz

Gabriel de Abreu

Gabriel Dias de Jesus

# Agenda

1. Objetivos
2. Análise de Curto-circuito
3. Análise da Estabilidade
4. Conclusões

# 1. Objetivos

- Objetivo principal
  - Utilizar o conhecimento construído durante todo o período de estudo;
  - Adquirir conhecimento sobre o uso de ferramentas computacionais:
    - Anafas – Curto-circuito;
    - Anatem – Estabilidade transitória
- Analisar a estabilidade em um sistema de 33 barras:
  - Identificar pontos críticos para a estabilidade;
  - Propor soluções para melhorar a estabilidade do sistema.

## 2. Análise de Curto-circuito

- Proteção;
- Tipos de curto;
- Ocorrências.

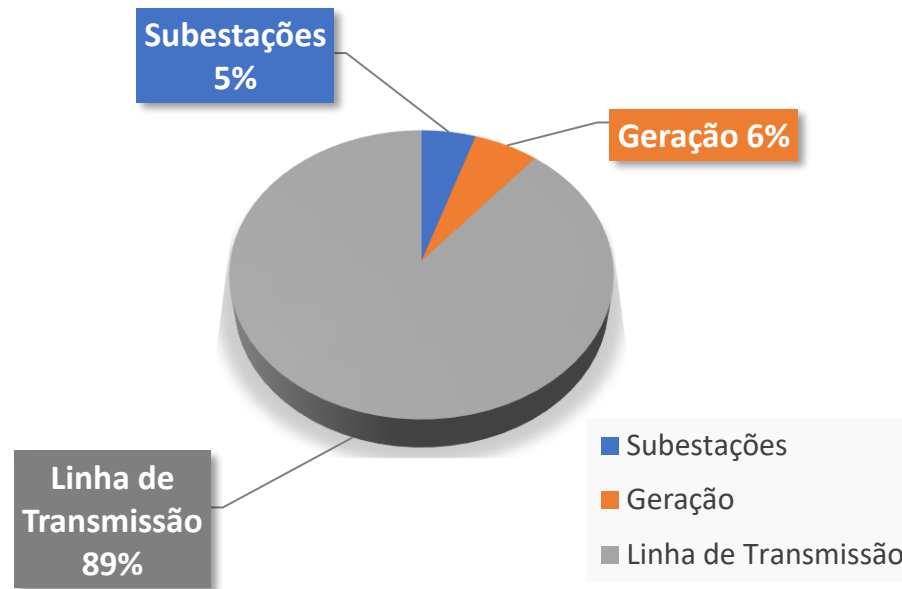


Gráfico 1: Principais locais de curto-circuito.

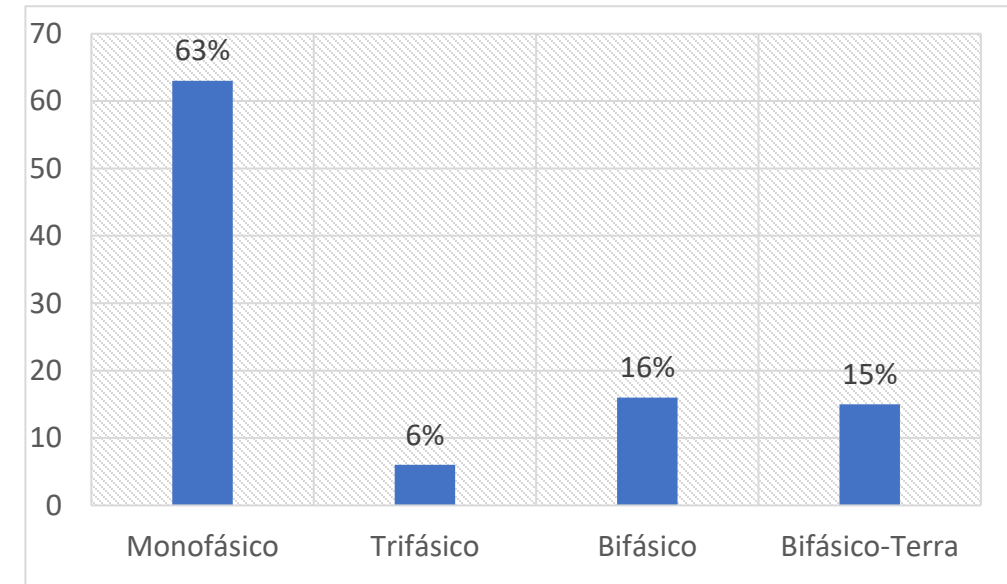


Gráfico 2: Principais tipos de curto-circuito.

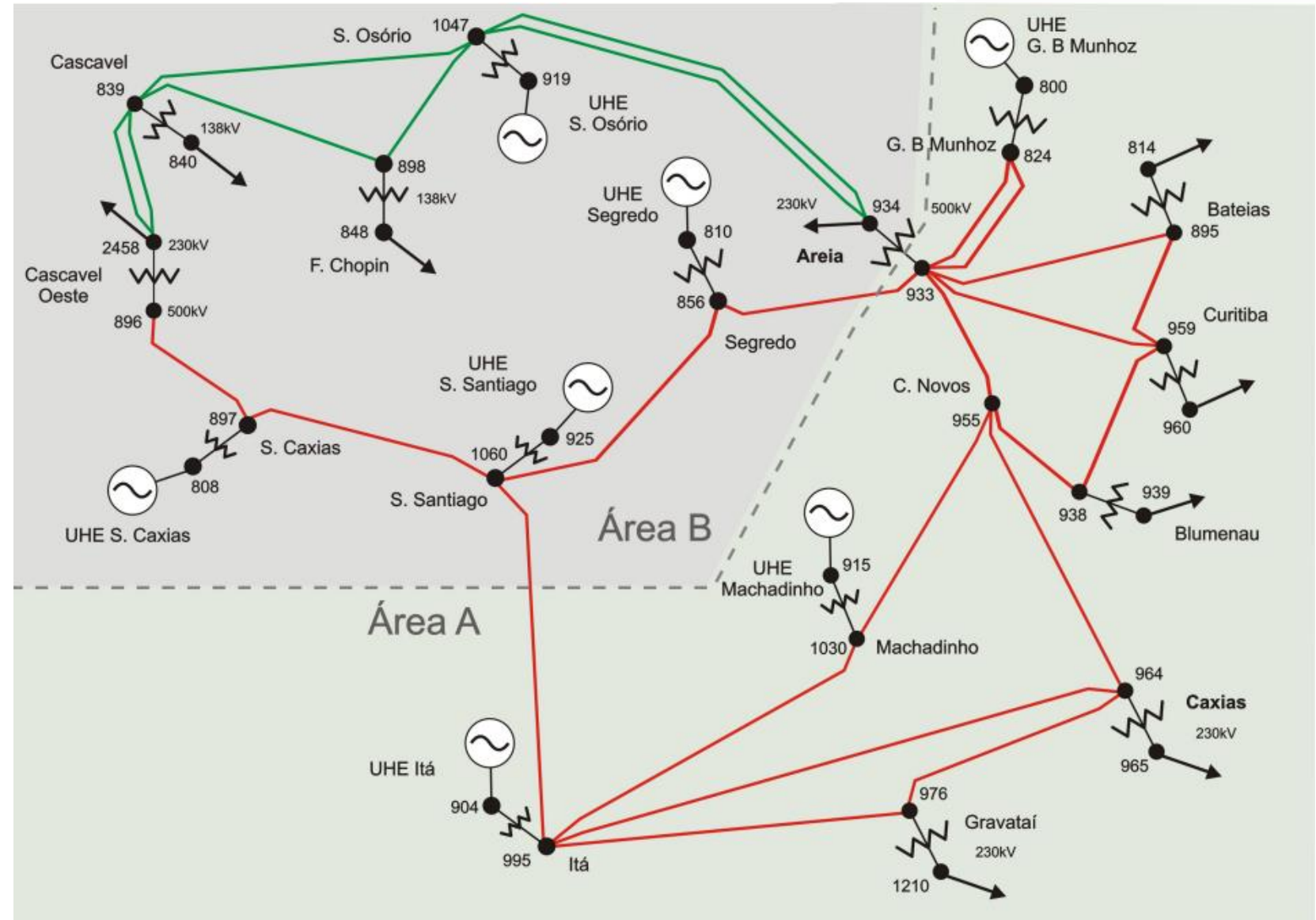
## 2. Análise de Curto-circuito

Tabela 1: Curto-circuito trifásico e monofásico.

	Trifásico (kA)	Monofásico (kA)
GB. MUNHOZ (800) - GR	343	288
S. CAXIAS (810) - GR	393	324
S. SANTIAGO (925) - GR	461	310
CASCADEL (939)	10	9
AREIA (934)	13	14
C. NOVOS (955)	10	8

# 3. Análise de estabilidade

- Conceito;
- Perturbações;
- Estabilidade transitória angular.



# 3. Análise de estabilidade

- Barras críticas;
- Análise do tempo crítico.
- Tempo crítico

Tabela 2: Tempo crítico de acordo com o variação de carga.

Barra	$T_c$ para carga leve – 70% (ms)	$T_c$ para carga base (ms)	$T_c$ para carga pesada – 130% (ms)
Itá (904)	918	488	346
S.Osório (919)	278	166	152

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{cr} - \delta_0)}{\omega_s P_m}}$$

# 3. Análise de estabilidade

Tabela 3:  $t_{cr}$  e  $\delta_{cr}$  para a variação da inércia da máquina de Itá em +10%

Barra	$T_c$ para carga base (ms)	Variação (%)
Itá (904)	520	-
$\delta_c(^{\circ})$	95	-
Itá (904) – H+10%	577	+11%
$\delta_c(^{\circ})$	95	0%

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (P_m - P_e^{durante}) d\delta + \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} (P_m - P_e^{pós-falta}) d\delta = 0$$

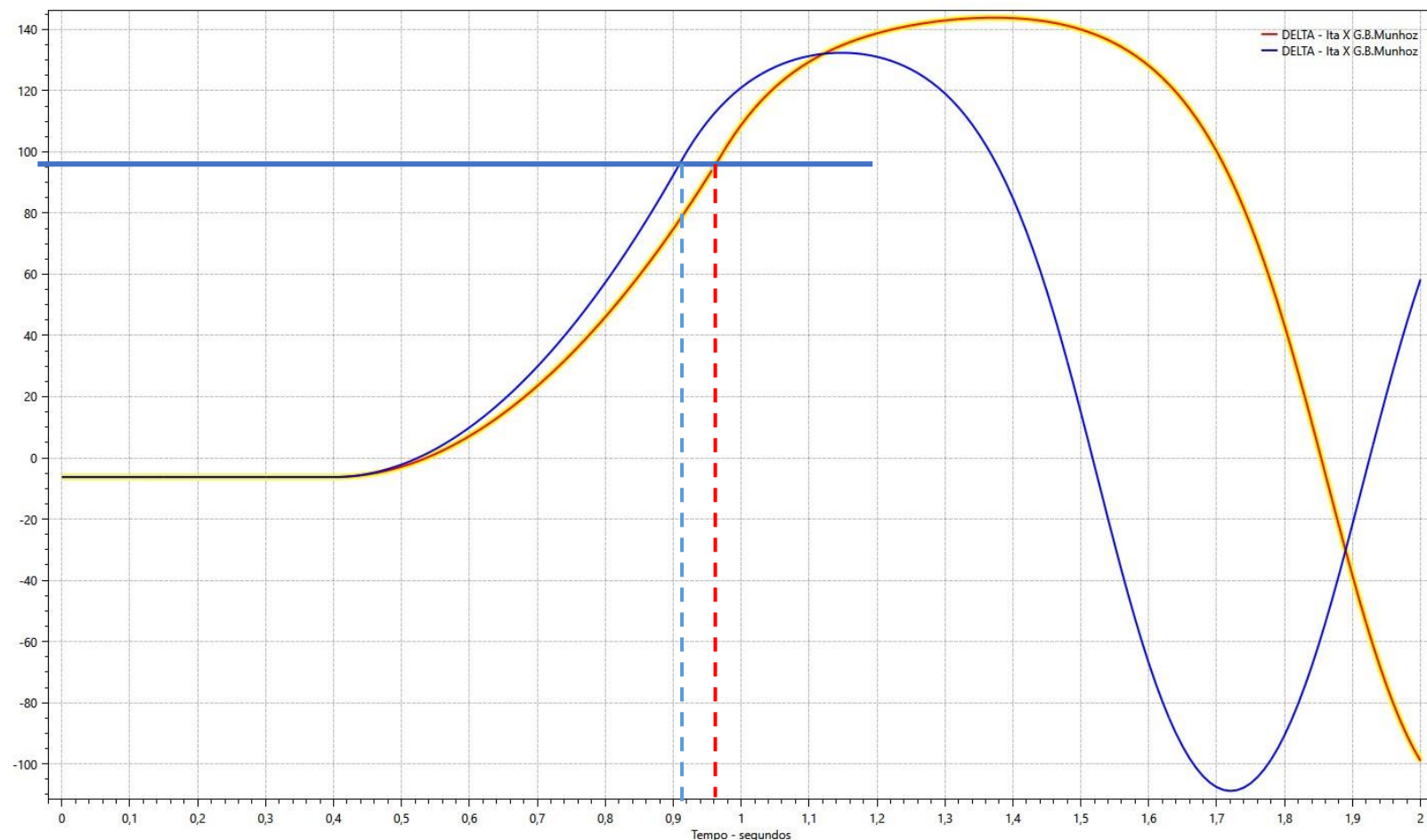


Figura 1: Variação da Inércia da máquina de Itá.



# 4. Análise de estabilidade

- Análise do ponto crítico

Demanda:

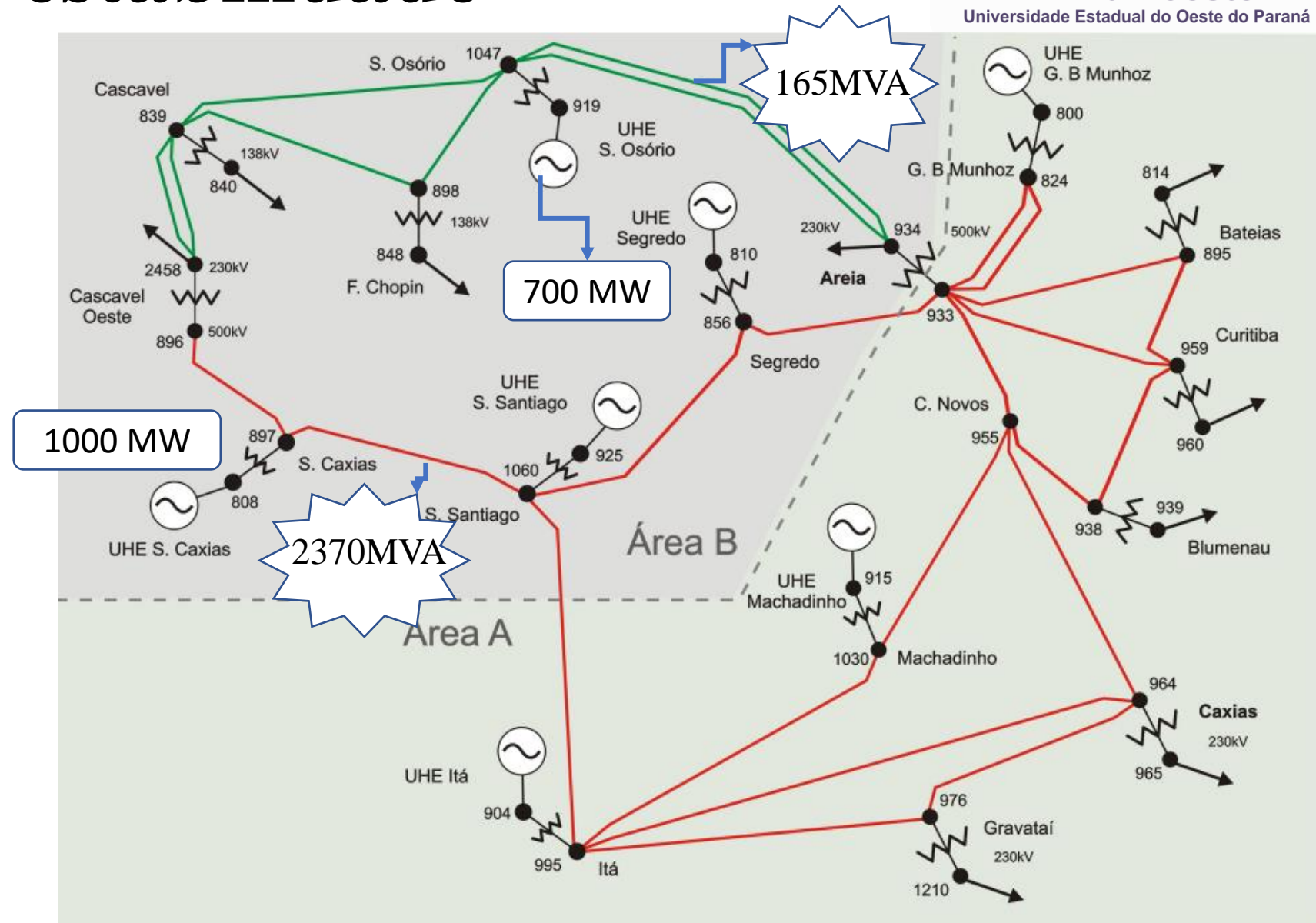
Área A: 4210 MW

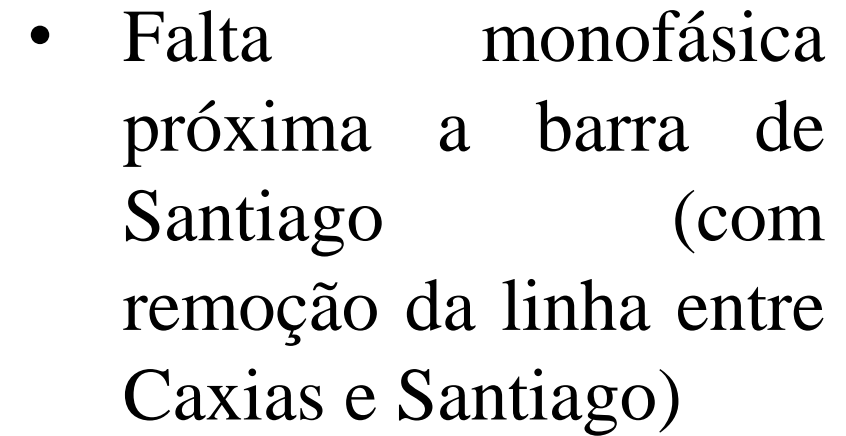
Área B: 875 MW

Geração:

Área A: 1719 MW

Área B: 3500 MW





# 4. Análise de estabilidade

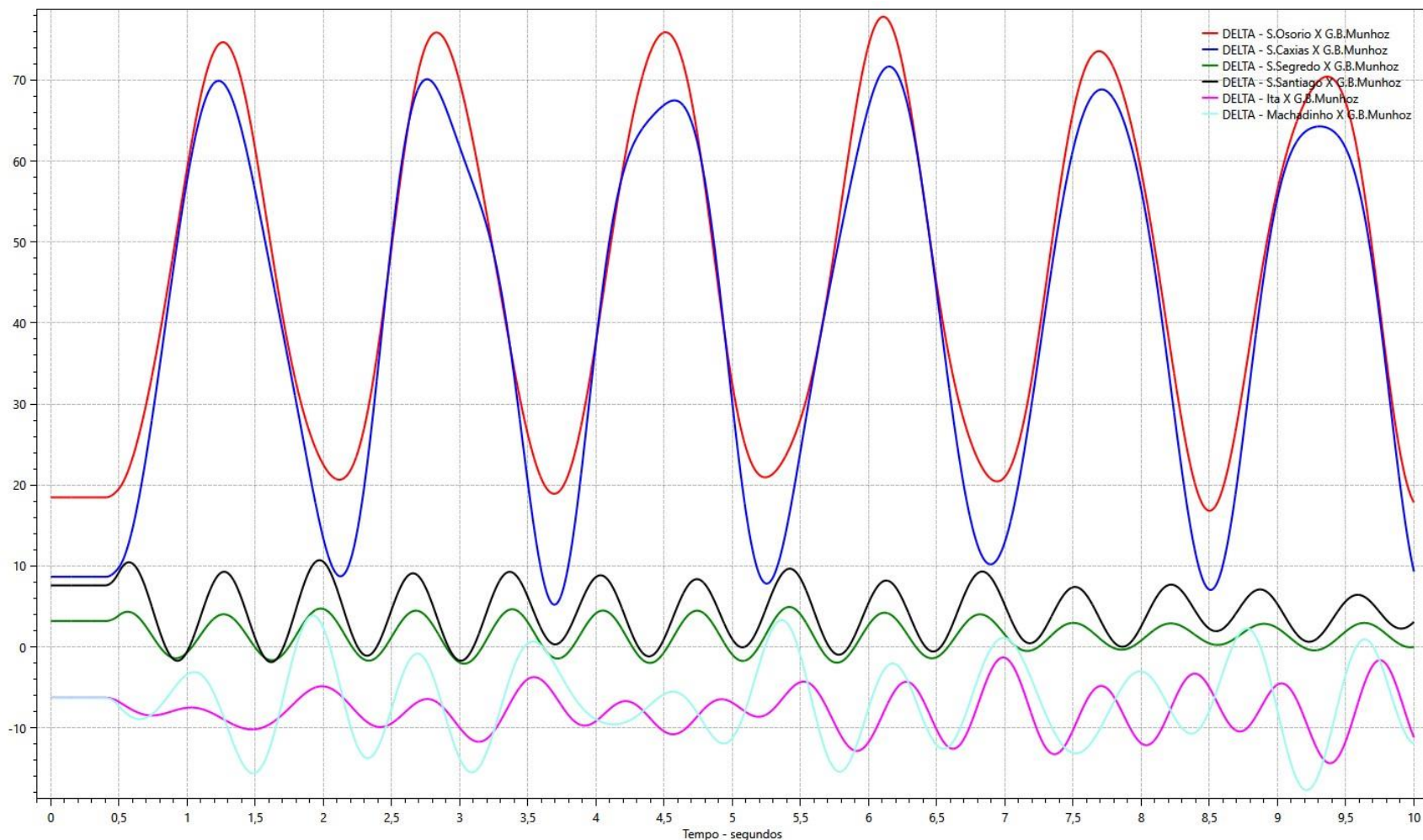
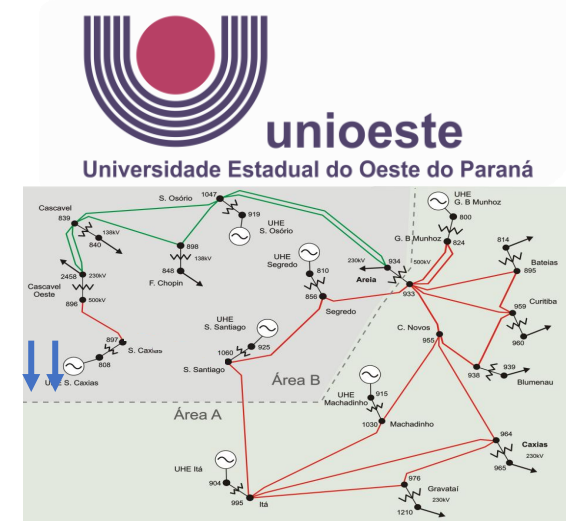


Figura 3: Estabilidade das máquinas após contingências.



- Contingências:
  - Desligar 2 máquinas em Salto Caxias.



# 4. Análise de estabilidade

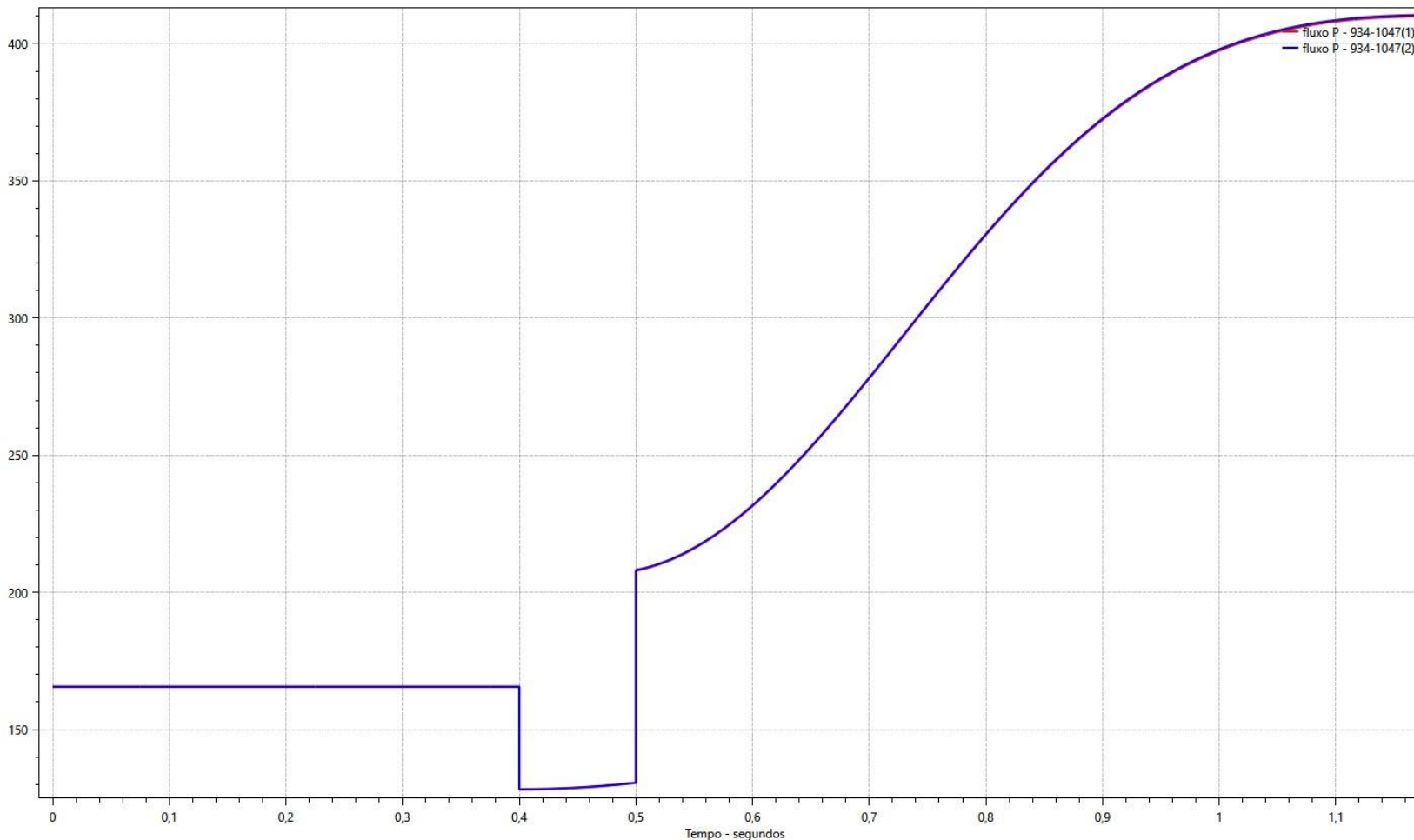
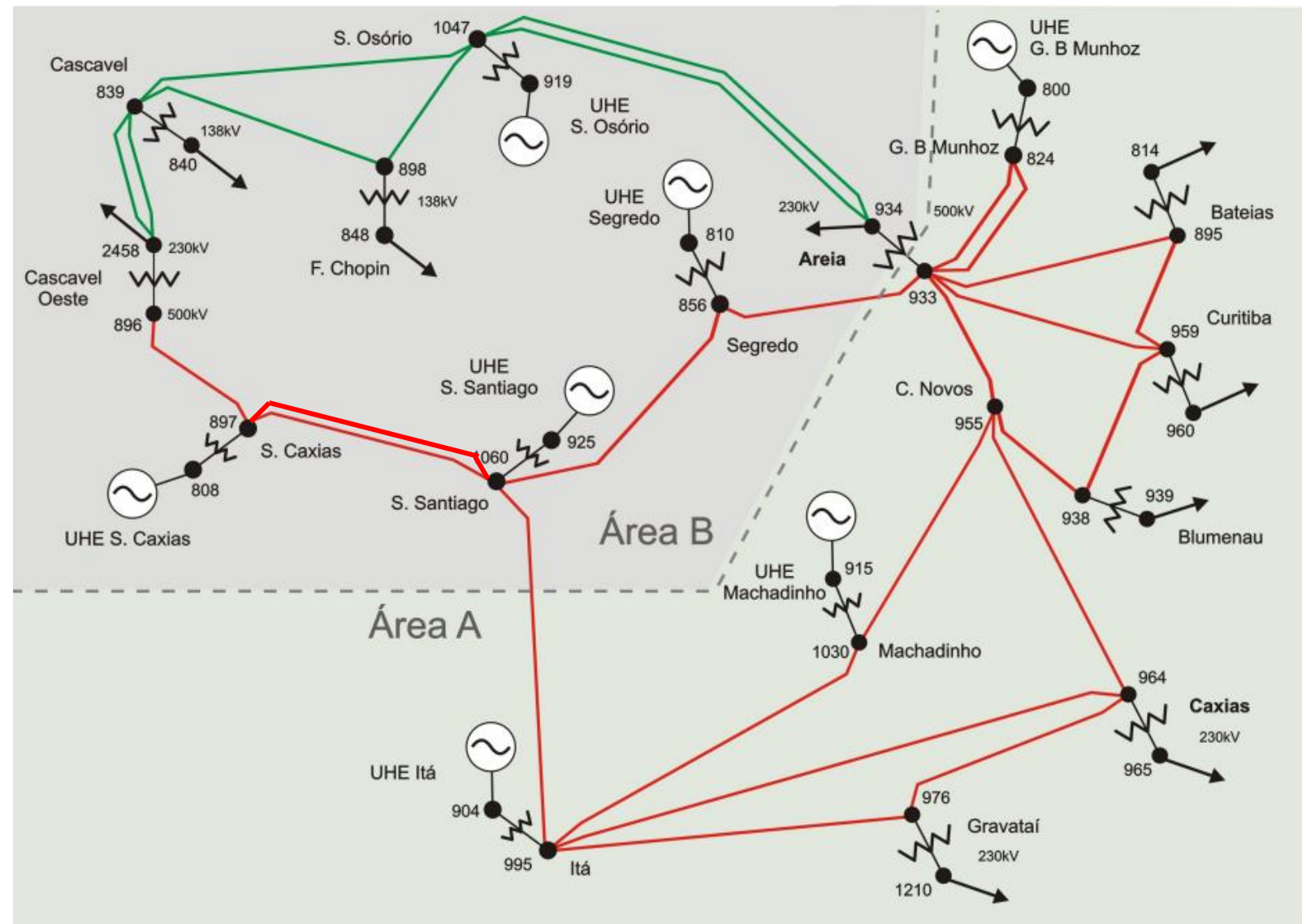


Figura 4: Fluxo na linha entre Osório e Areia.

- Fluxo de potência de 165MVA;  
Capacidade de emergência  
319MVA;
- Passam a atingir um fluxo de mais  
de 400 MVA.

# 4. Análise de estabilidade

- Prevenções
  - Construir outra linha entre Caxias e Santiago;



# 4. Análise de estabilidade

- Construir outra linha entre Caxias e Santiago;

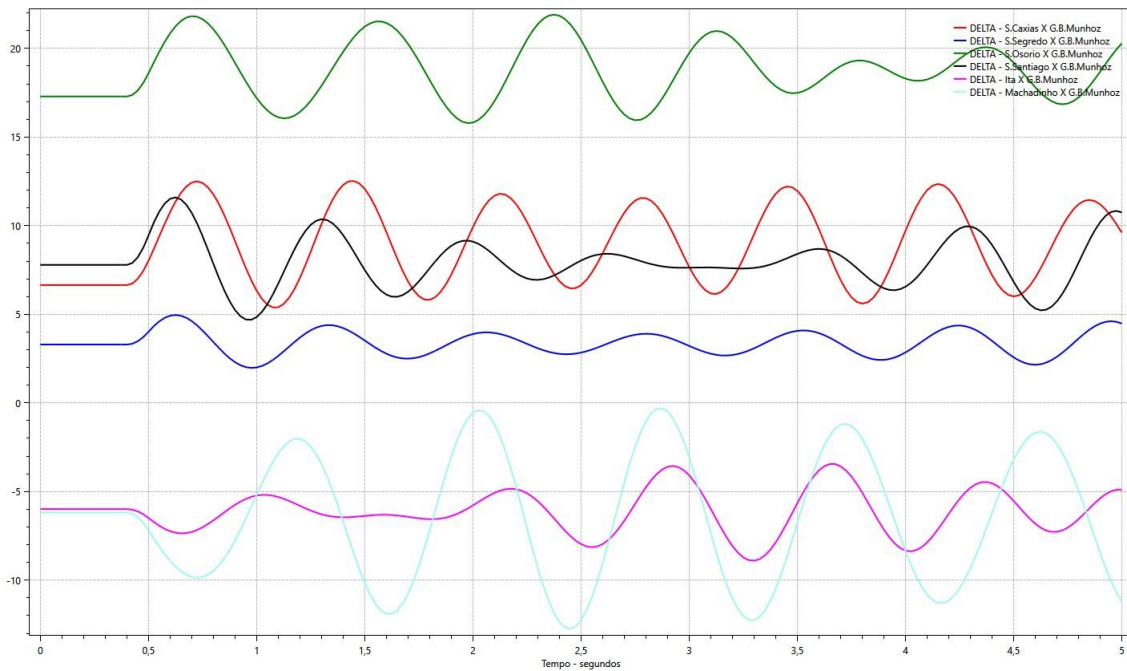


Figura 5: Curva de oscilação das máquinas

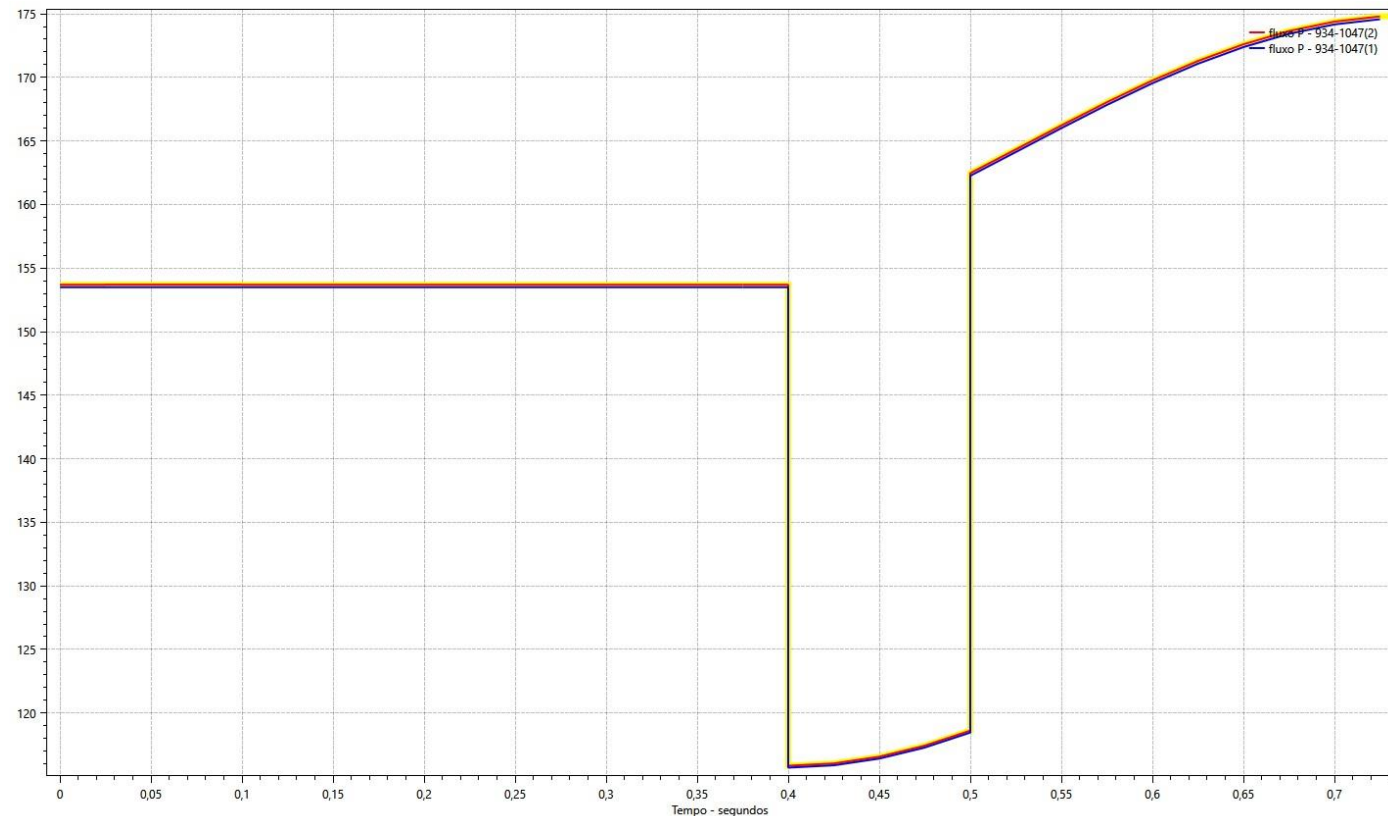


Figura 6: Fluxo na linha entre Osório e Areia.

# 4. Análise de estabilidade





**unioeste**  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná

- Tabela 4: Características do sistema.

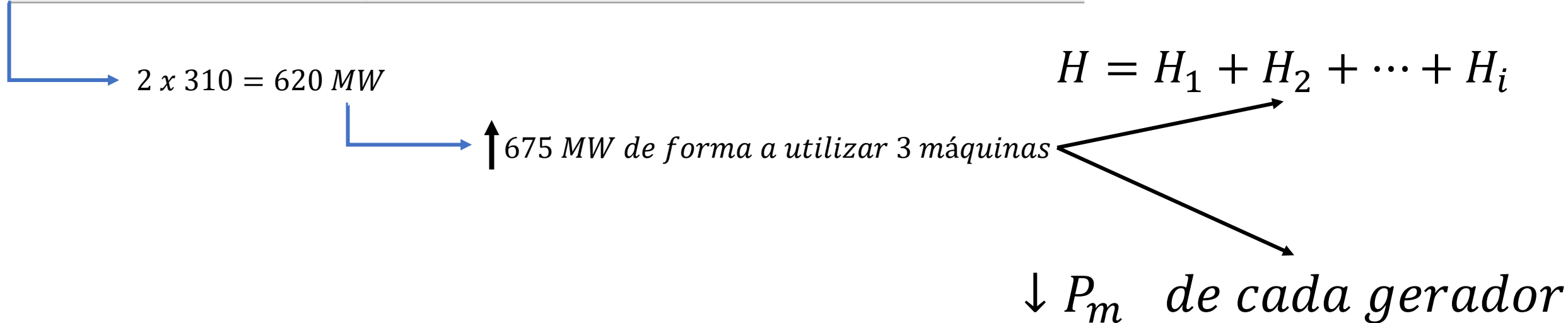


# 4. Análise de estabilidade

- Novo despacho
  - Menor potência para o maior número de máquinas

Tabela 5: Características das máquinas da usina de S. Caxias.

Nome	Nº de máquinas	Geração máxima por máquina
S. Caxias	4	310 MW



## 4. Análise de estabilidade

- Resultado após um novo despacho.

Tabela 6: Análises do tempo crítico e do delta crítico antes e após um realizado um novo despacho.

Despacho	Itá		S. Osorio	
	$t_{cr} (ms)$	$\delta_c (^\circ)$	$t_{cr} (ms)$	$\delta_c (^\circ)$
Antigo	488	95	166	54
Novo	337	80	297	81

Tabela 6: Análises das perdas elétricas antes e após realizado um novo despacho.

Despacho	Perdas (MW)	Variação
Antigo	134	-31%
Novo	94	

## 8. Conclusões

- Os objetivos desse trabalho foram atingidos.
  - A bagagem de conhecimento de cada um da equipe ajudou em cada ponto da realização do trabalho.
  - O conhecimento sobre a utilização dos softwares foram alcançadas, assim como a análise dos resultados das simulações.
- Ao se tratar da analisar de estabilidade do sistema exposto, conseguimos:
  - Identificar pontos críticos para a estabilidade;
  - Propor soluções para melhorar a estabilidade do sistema.
- Sobretudo, conseguimos validar o nosso conhecimento frente à análise e resolução de um problema.

# OBRIGADO!

# Principais Motivos de Curtos Trifásicos

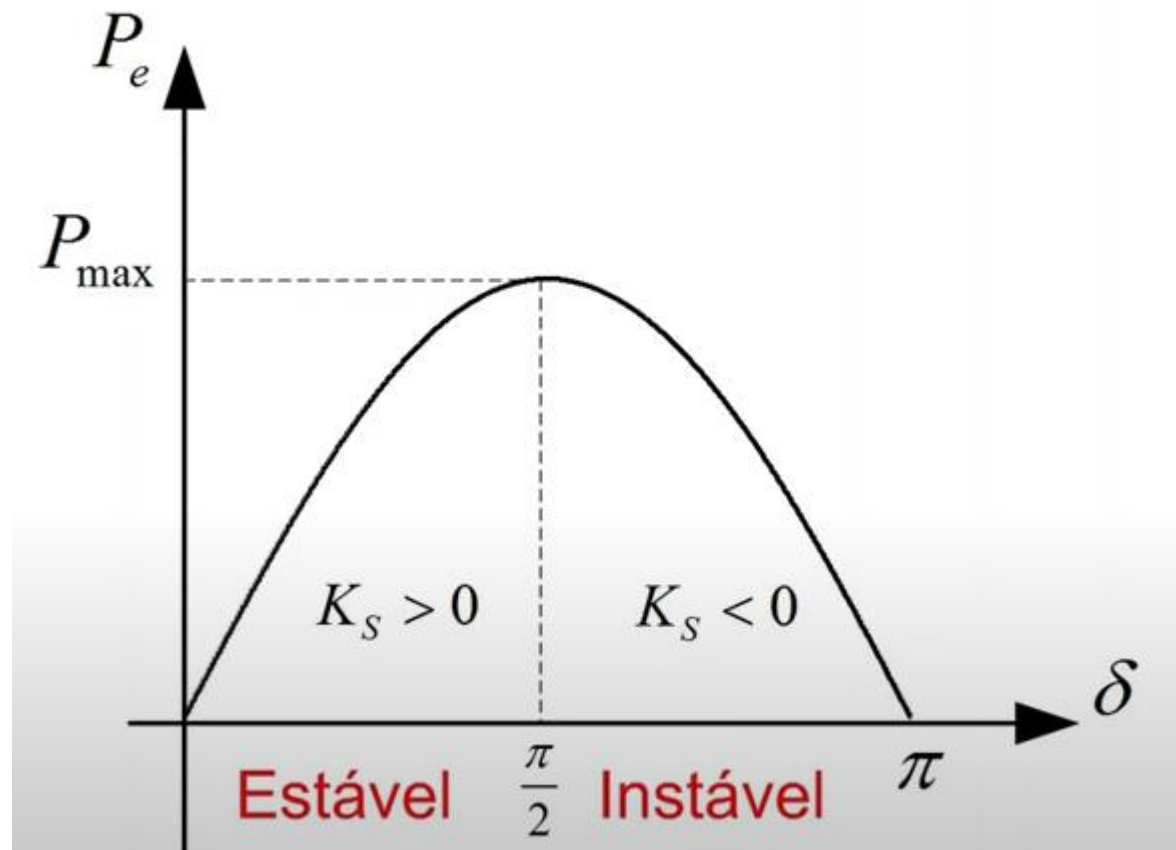


# Extra - Estabilidade

# 3. Análise de estabilidade

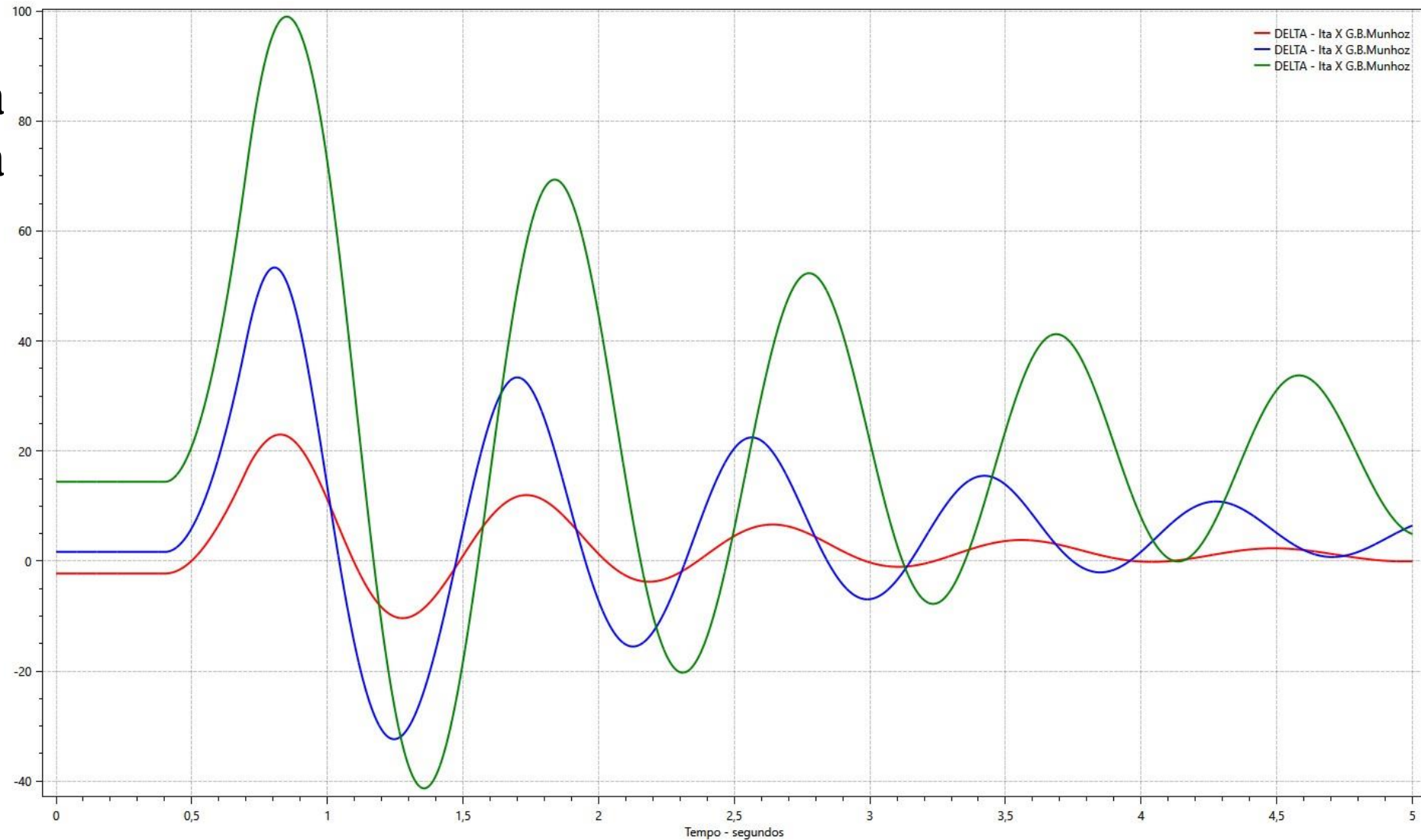
- Coeficiente de potência sincronizante

$$K_S = S_p = \left. \frac{dP_e}{d\delta} \right|_{\delta=\delta_0} = P_{\max} \cos \delta_0$$



# 3. Análise de estabilidade

- Oscilação da máquina de Itá para diferentes carregamentos.





# 3. Análise de estabilidade

Tabela 2:  $t_{cr}$  e  $\delta_{cr}$  para a variação da inércia da máquina de Itá em +10%

Barra	$T_c$ para carga leve – 70% (ms)	$T_c$ para carga base (ms)	$T_c$ para carga pesada – 130% (ms)
Itá (904)	918	520	346
$\delta_c(^{\circ})$	113	95	88
Itá(904) – H+10%	1641	574	385
$\delta_c(^{\circ})$	113	95	88

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (P_m - P_e^{durante}) d\delta + \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} (P_m - P_e^{pós-falta}) d\delta = 0$$

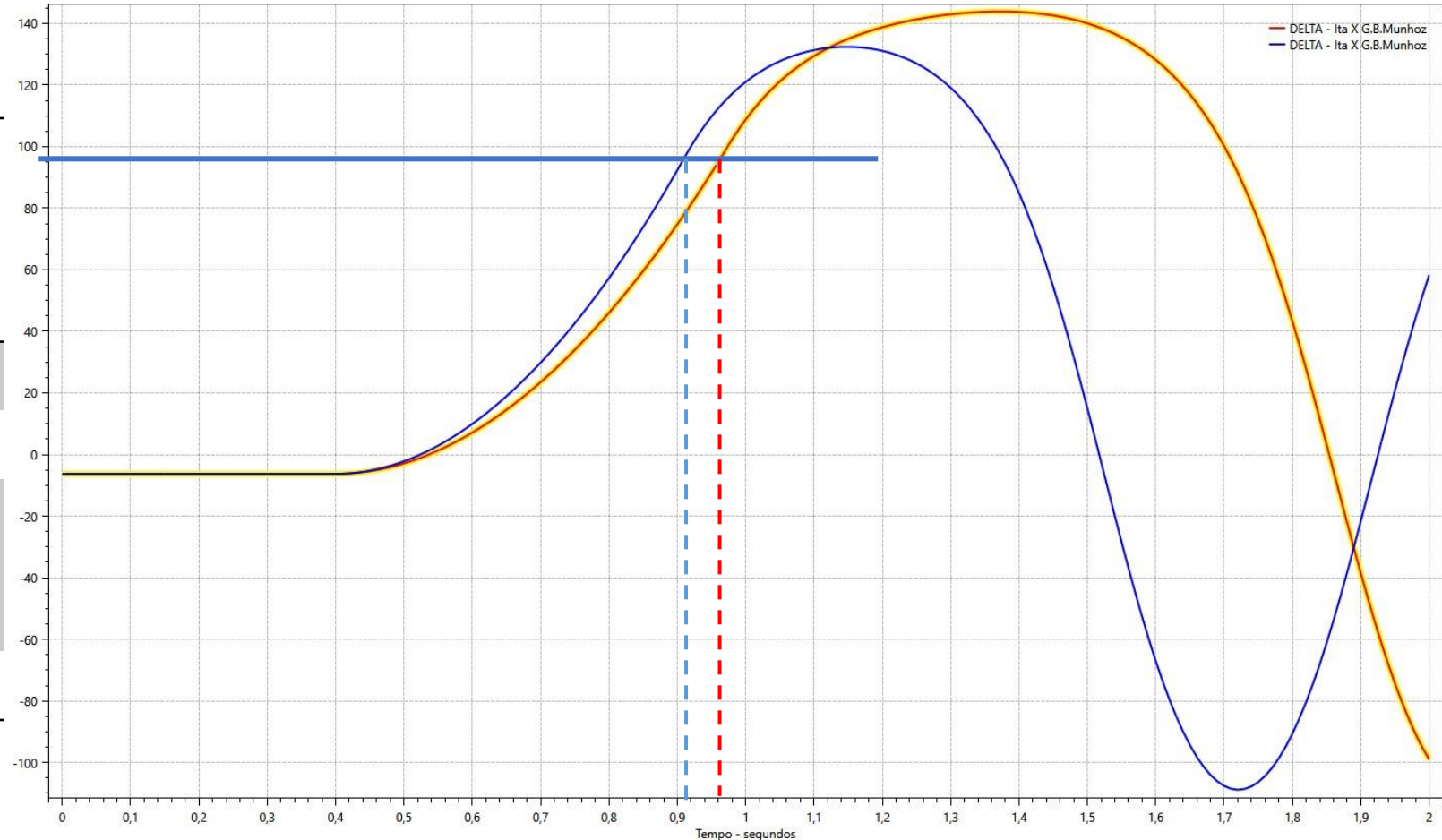


Figura X: Variação da Inércia da máquina de Itá.

# 4. Análise de estabilidade

Tabela 3:  $t_{cr}$  das outras máquinas em relação à variação da inércia da máquina de Itá

Nome (Barra)	Carga média – H normal (ms)	Carga média – H +10% (ms)
<b>S. Santiago (925)</b>	342	342
<b>S. Segredo (810)</b>	391	392
<b>S. Caxias (808)</b>	322	317
<b>Machadinho (915)</b>	577	572
<b>Itá (904)</b>	488	546
<b>S. Osorio (919)</b>	177	178

$$\frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2H_i} (P_{mi} - P_{ei})$$

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{cr} - \delta_0)}{\omega_s P_m}}$$

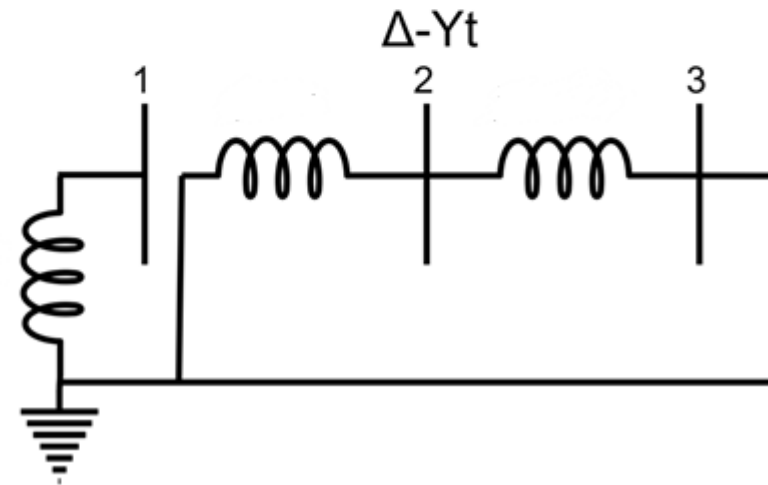
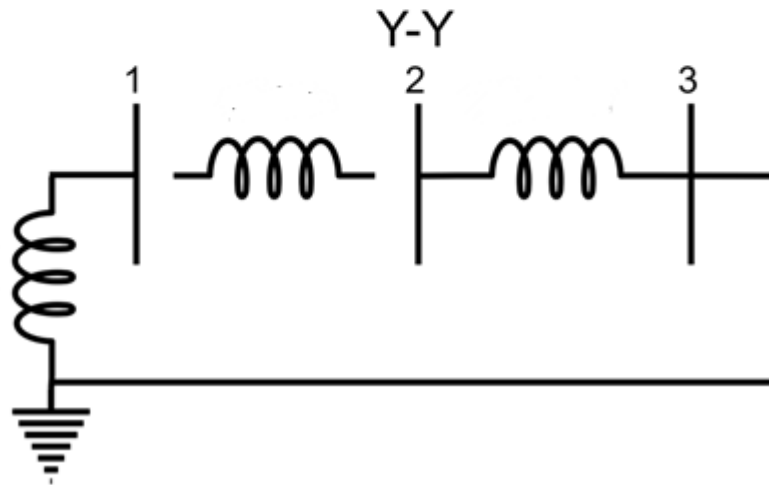
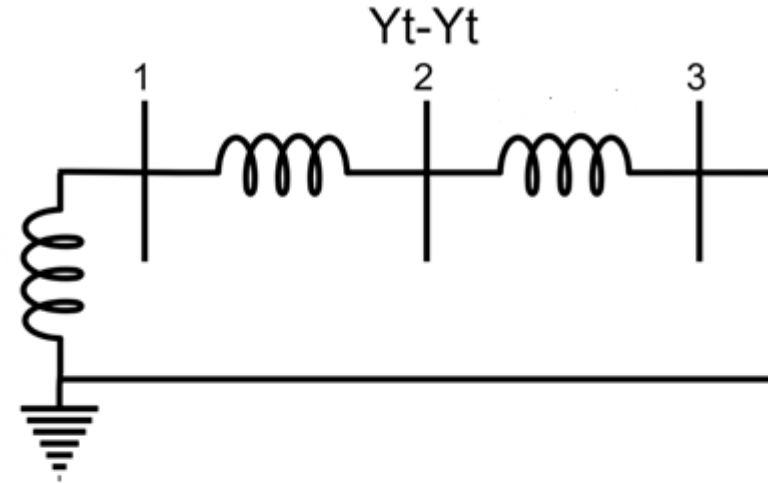
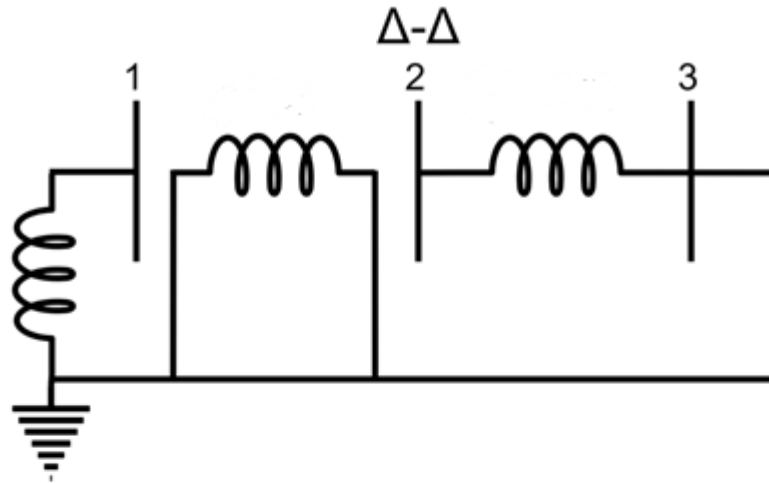
# 4. Análise de estabilidade

	Geração máxima (MW)	Geração atual (MW)	Novo Despacho (MW)
<b>Área A</b>			
Munhoz	1676	919	919
Itá	1450	400	985 ↑
Machadinho	1140	400	800 ↑
<b>Área B</b>			
Segredo	1260	1000	675 ↓
Caxias	1240	1000	675 ↓
Osório	728	700	370 ↓
Santiago	1420	800	750 ↓

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (P_m - P_e^{durante}) d\delta + \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} (P_m - P_e^{pós-falta}) d\delta = 0$$

$$\delta_{cr} = \frac{\omega_s}{4H} P_m t_{cr}^2 + \delta_0$$

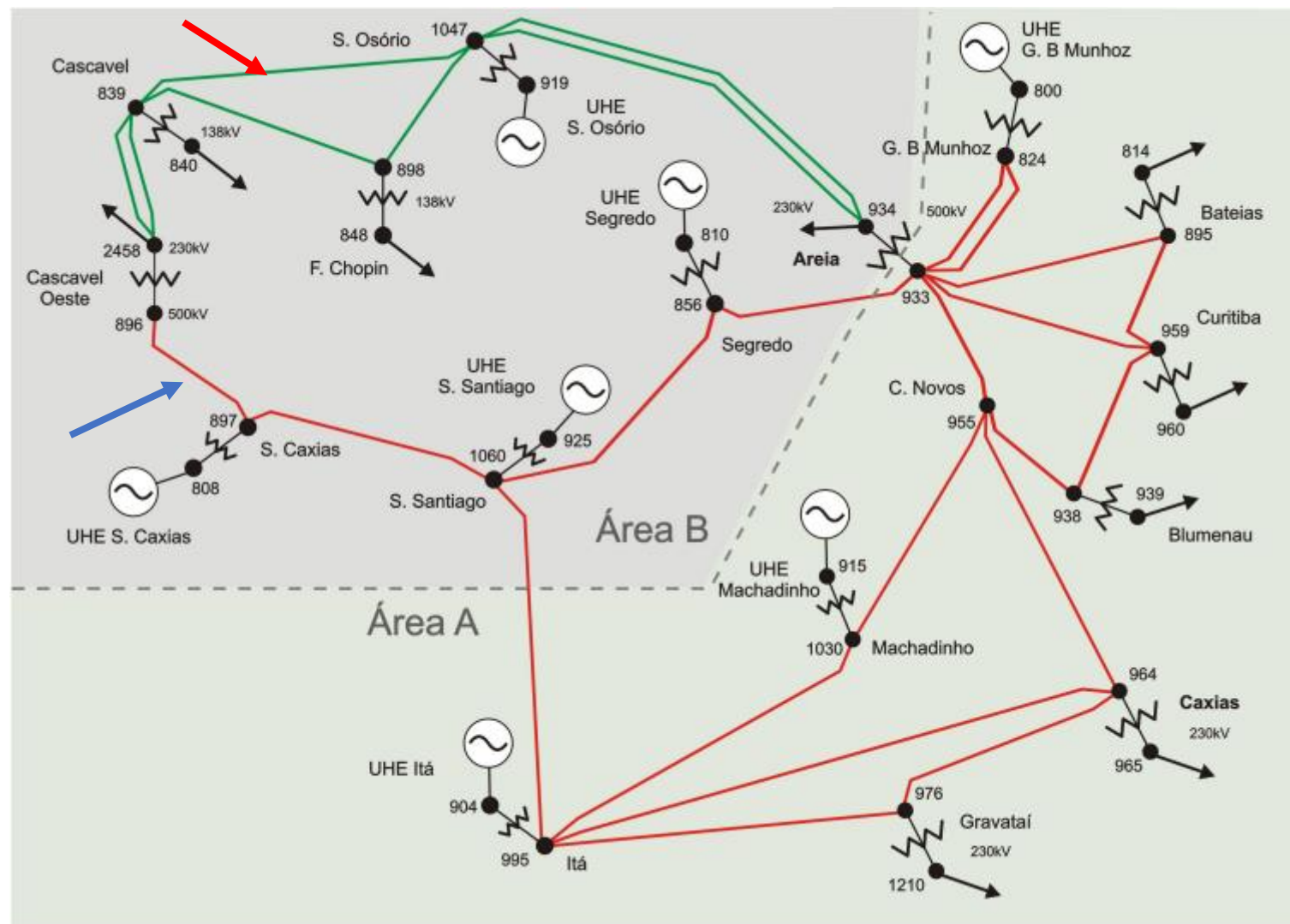
# Trafos sequência



# Falta entre Cascavel Oeste e Caxias

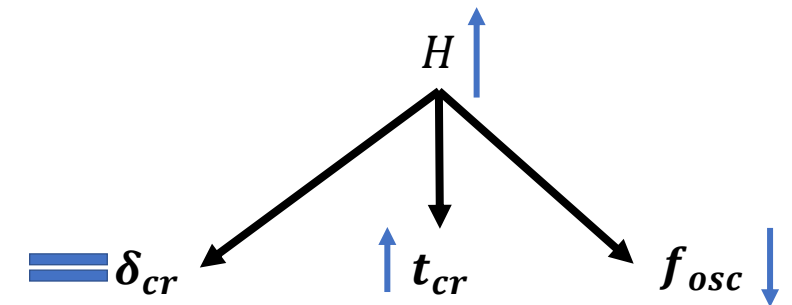
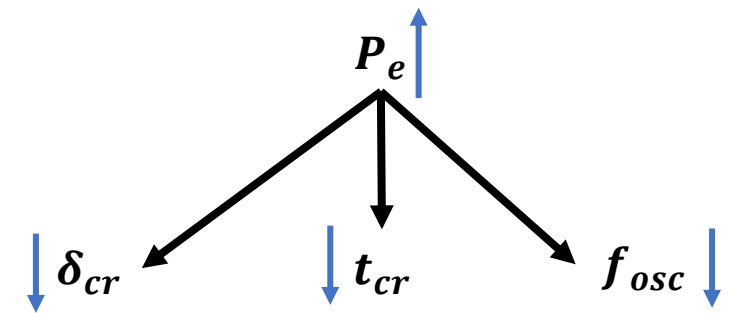
Não entra em instabilidade, mas algumas linhas começam a operar em regime de emergência.

Que é o que acontece na linha (839-1047), a qual possui uma capacidade normal de 189MVA e está trabalhando em capacidade de emergência: 225MVA

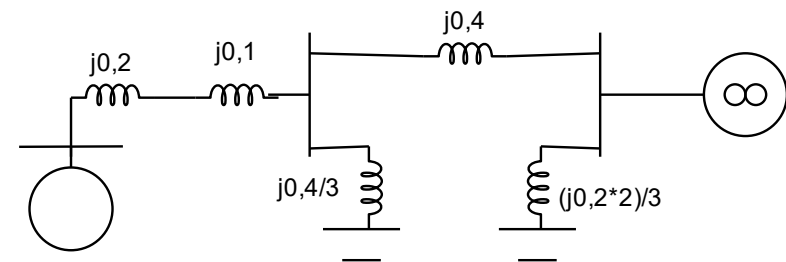


# Análise da influência da variação da $P_e$ e $H$

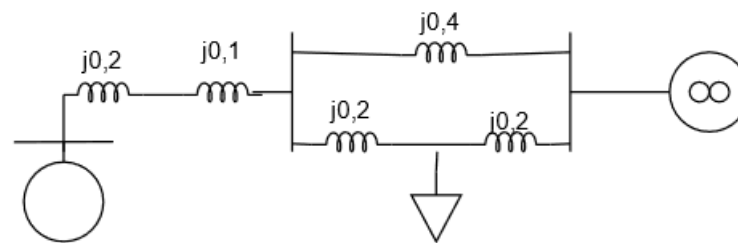
$P_e$	$H$	$\delta_{cr}$ (°)	$t_{cr}$ (s)	$f_{osc}$ (Hz)
0,8	5	90,71	0,28	1,346
	8	90,84	0,35	1,067
	11	90,83	0,42	0,945
1	5	81,23	0,22	1,320
	8	81,71	0,28	1,049
	11	81,36	0,33	0,941
1,2	5	74,61	0,18	1,270
	8	74,86	0,22	1,030
	11	74,65	0,26	0,938



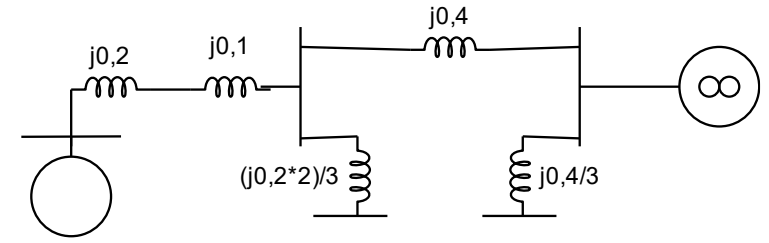
# Analises do curto ao longo da linha



Falta a 1/3 da barra



Falta a 1/2 da barra



Falta a 2/3 da barra

$$Y_{bus \text{ durante a falta}} = \begin{bmatrix} -j2,5 & j0,62 \\ j0,62 & -j5,78 \end{bmatrix}$$

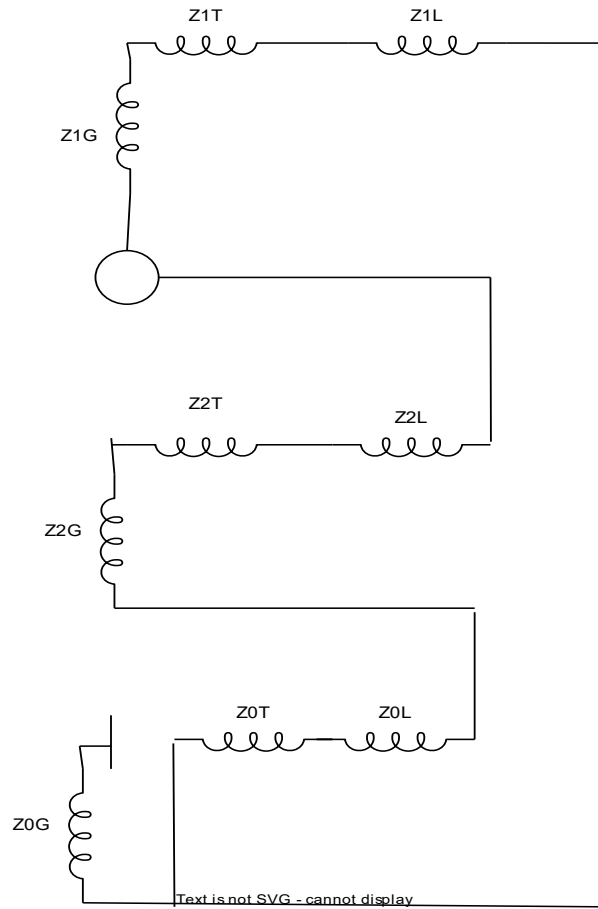
$$Y_{bus \text{ durante a falta}} = \begin{bmatrix} -j2,3 & j0,767 \\ j0,767 & -j6,92 \end{bmatrix}$$

$$Y_{bus \text{ durante a falta}} = \begin{bmatrix} -j1,76 & j1,17 \\ j1,17 & -j9,11 \end{bmatrix}$$

$$P_e = |E'_1| |V_\infty| |Y_{12}| \sin(\delta)$$

Falta a $\frac{1}{3}$ da barra 1		Falta no meio da barra 1		Falta a $\frac{2}{3}$ da barra 1	
$\delta_{critico}$	$t_{cr} \text{ (s)}$	$\delta_{critico}$	$t_{cr} \text{ (s)}$	$\delta_{critico}$	$t_{cr} \text{ (s)}$
96,36°	0,37	109,88°	0,40		

# Analises do curto Mono e Tri



*Agora temos:*

$$I_{1\phi} = 3 \frac{1}{2(Z_{eq}) + (Z_{0eq})}$$

$$I_{3\phi} = \frac{1}{(Z_{eq})}$$

Caso 2:  $Z_{0eq} > Z_{eq}$

$$I_{1\phi} < I_{3\phi}$$

Caso 3:  $Z_{0eq} < Z_{eq}$

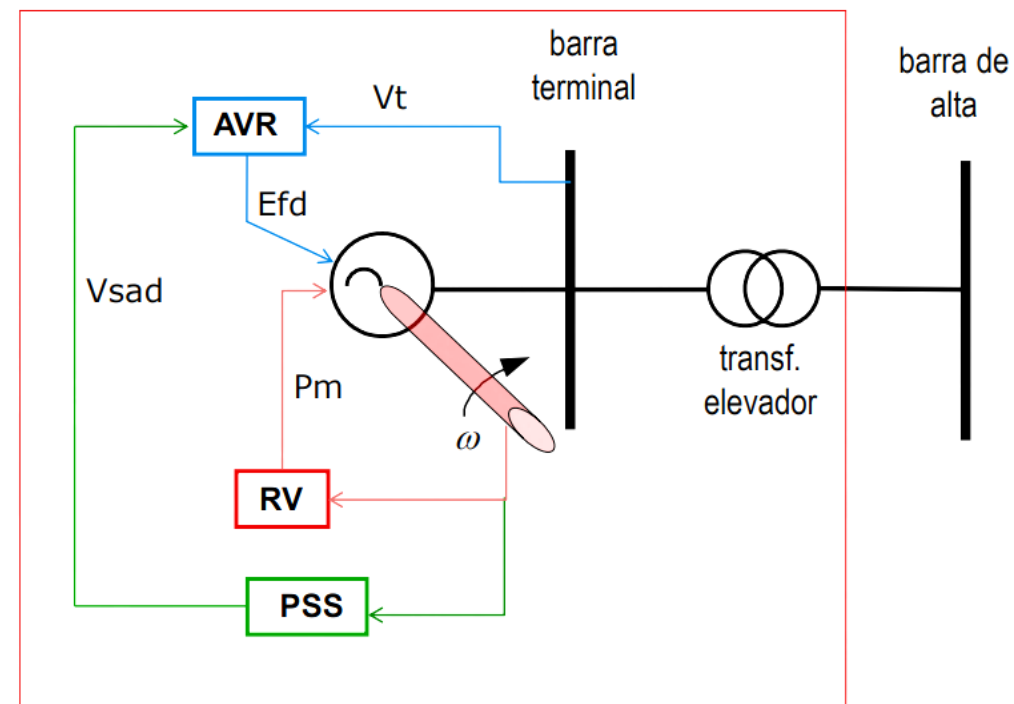
$$I_{1\phi} > I_{3\phi}$$



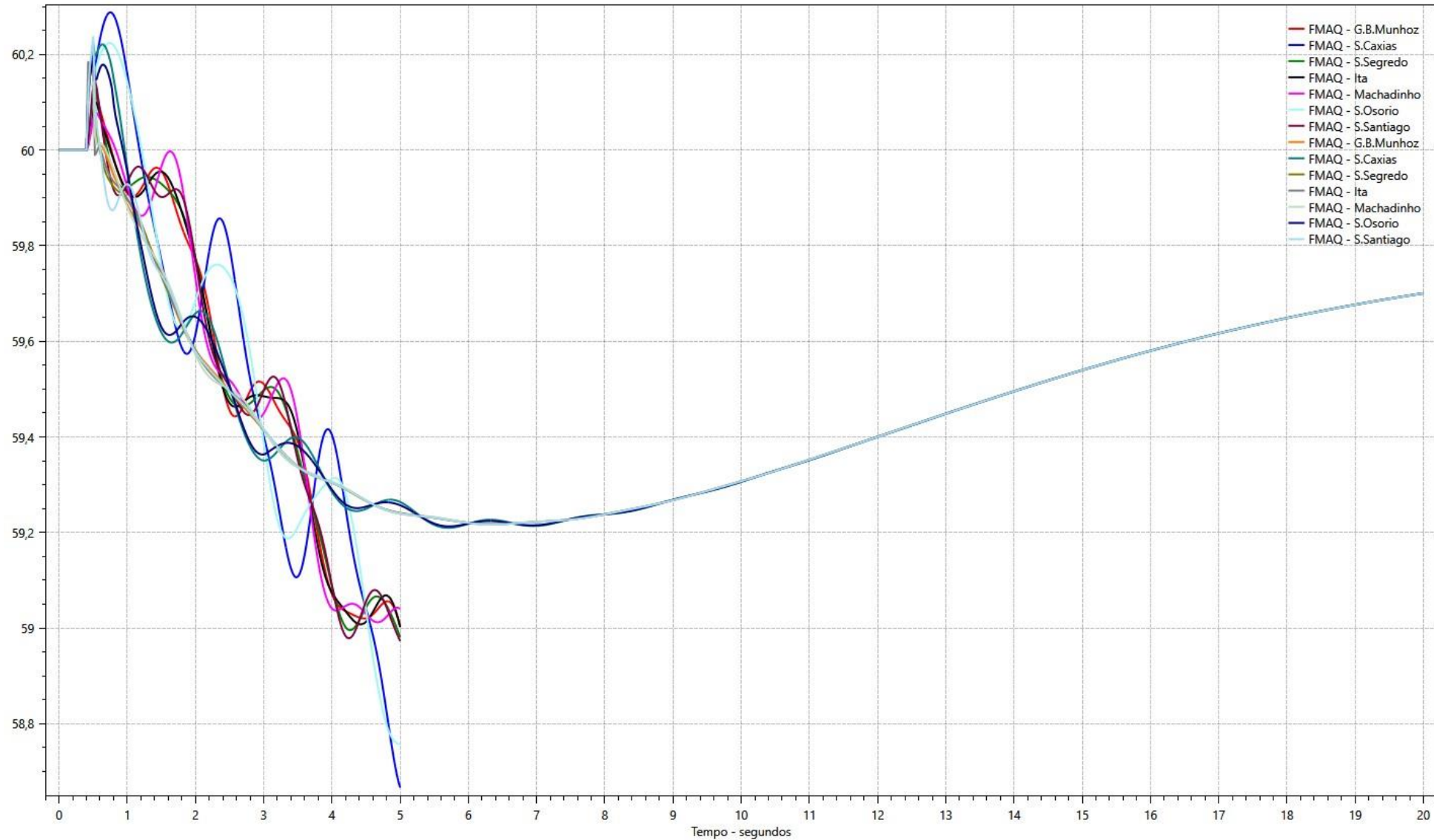
# Extra - Controladores

# Controladores

- **Regulador de tensão (AVR):** Controla a corrente de campo da máquina e atua, dentro dos seus limites para manter a tensão terminal da máquina num valor de referência;
- **Estabilizador de sistema de potência (PSS):** Atua no sistema de excitação para amortecimento das oscilações eletromecânicas;
- **Regulador de velocidade (RV):** é o controle mais lento em relação aos anteriores e atua no controle da rotação da turbina (frequência). Consequentemente, varia a potência ativa produzida pelo gerador, ajustando o balanço Carga vs Geração.



- **Regulador de velocidade (RV):** é o controle mais lento em relação aos anteriores e atua no controle da rotação da turbina (frequência). Consequentemente, varia a potência ativa produzida pelo gerador, ajustando o balanço Carga vs Geração.

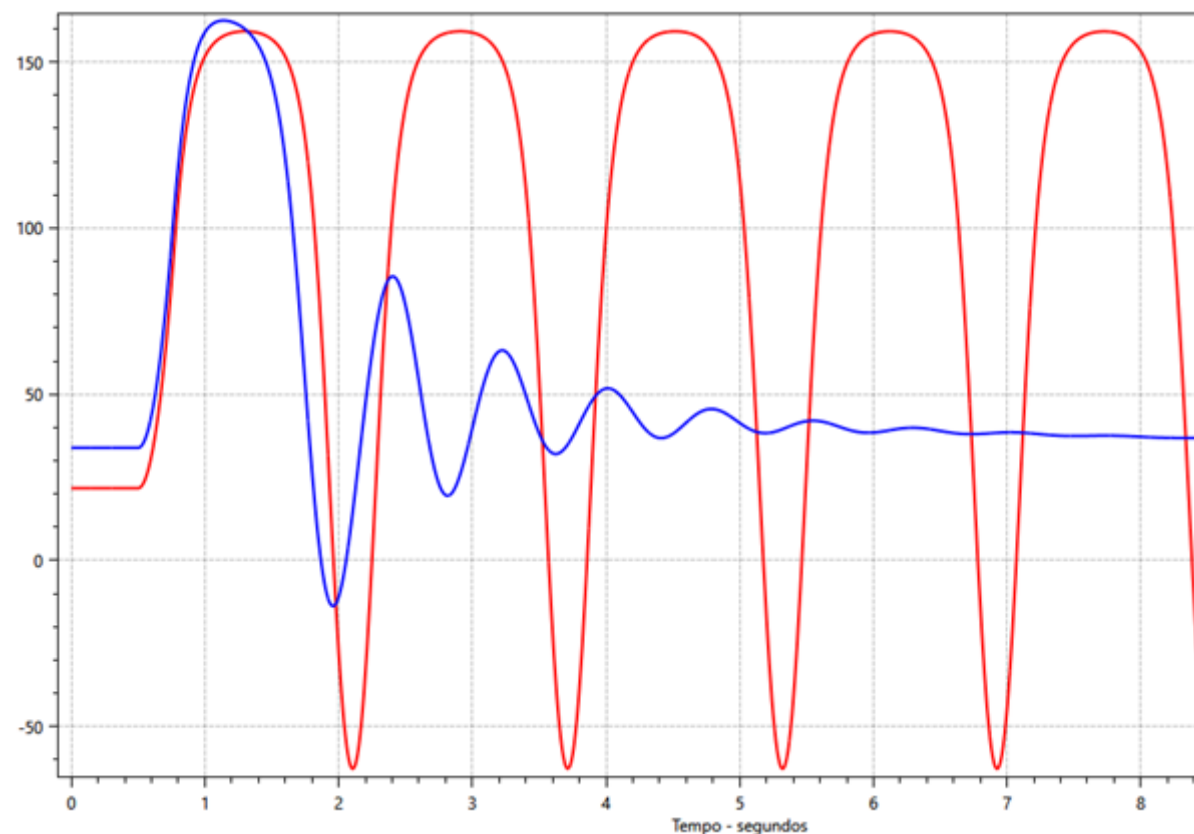


# 7. Utilização de reguladores

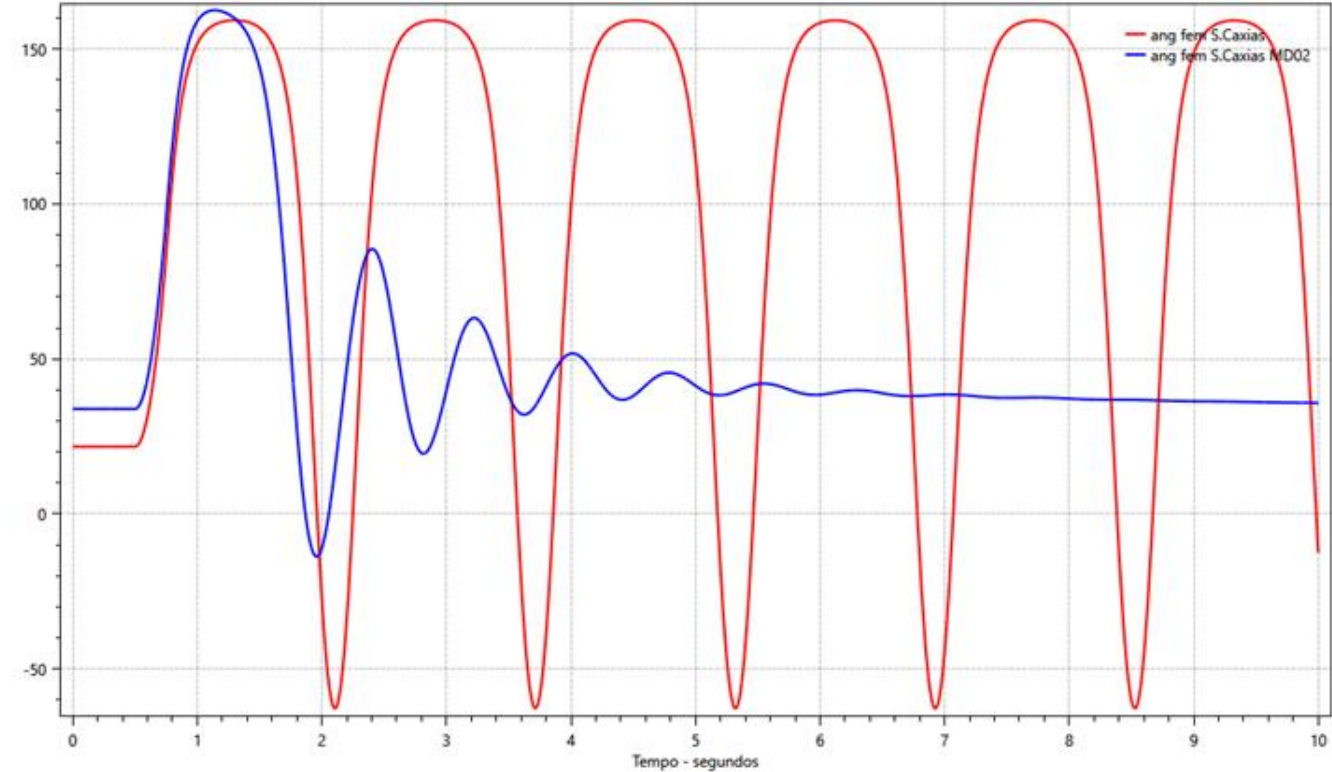
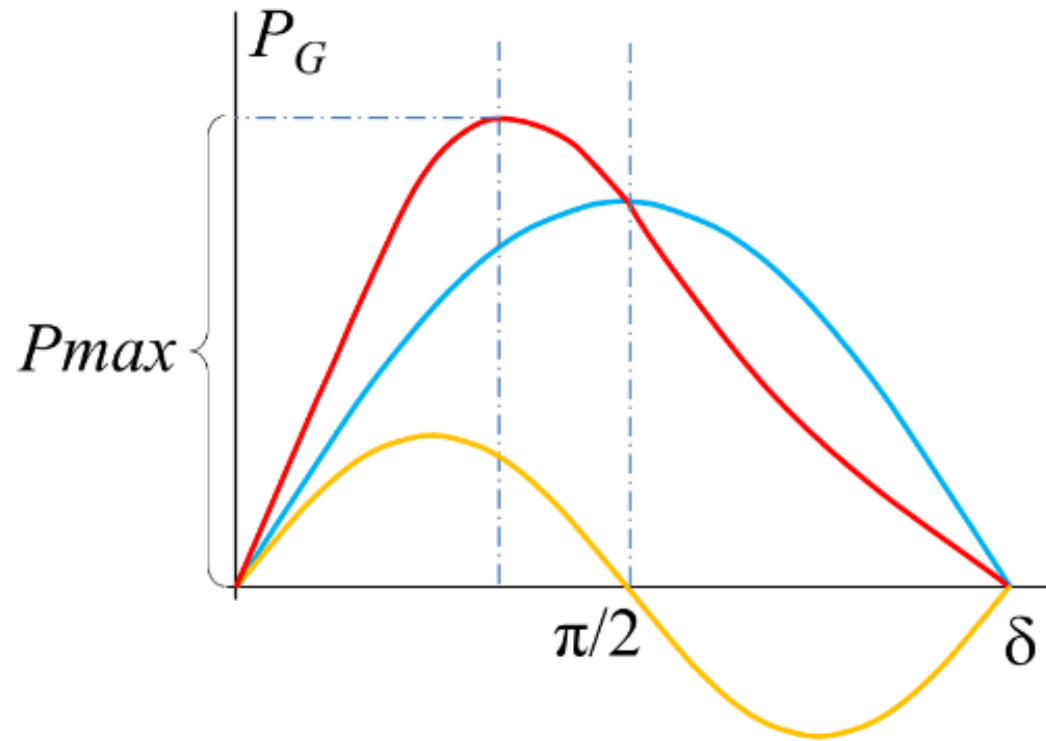
Nome (Barra)	Carga média Sem controlador (s)	Carga média Com controlador (s)
<b>S. Santiago (925)</b>	0,34	0,33
<b>S. Segredo (810)</b>	0,39	0,38
<b>S. Caxias (808)</b>	0,32 Osorio instável	0,31 Caxias instável
<b>Machadinho (915)</b>	0,58	0,48
<b>Itá (904)</b>	0,48	0,46
<b>S. Osorio (919)</b>	0,16	0,16
<b>GB. Munhoz (800) ref. Itá.</b>	0,47	0,46
<b>Areia - 933</b>	0,59	0,70
<b>Linha 1060- 995</b>	0,49	0,54

# 7. Utilização de reguladores

Barra	Sem controlador (s)	Com controlador (s)
Segredo	0,39	0,31
Itá	0,48	0,46
Osório	0,16	0,16

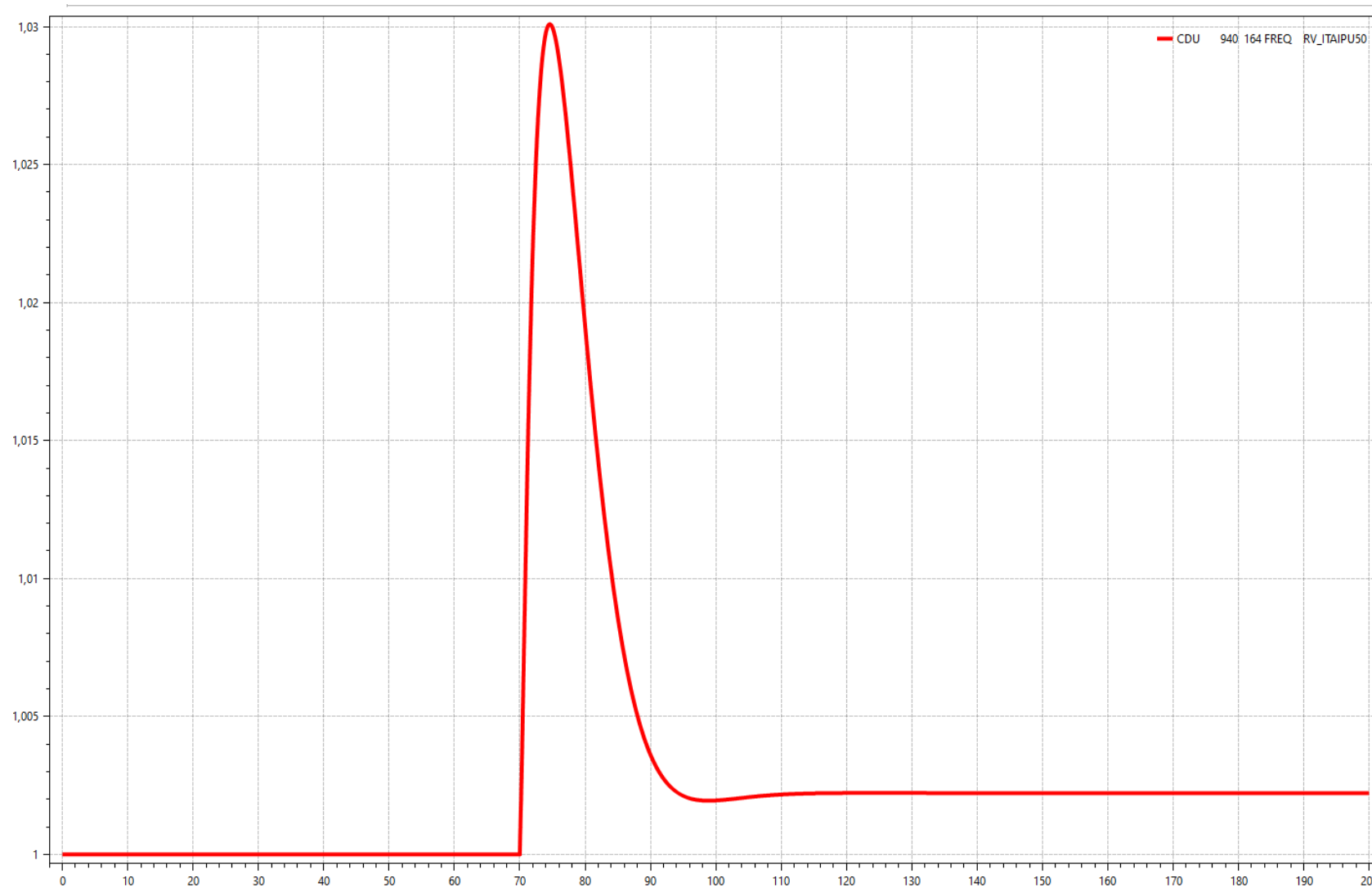


# 7. Máquina clássica x Polos salientes



$$P_G = \frac{|V||E|}{X_d} \text{sen} \delta + \frac{|V|^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{sen} 2\delta$$

# 7. Atuação do Regulador de Velocidade.

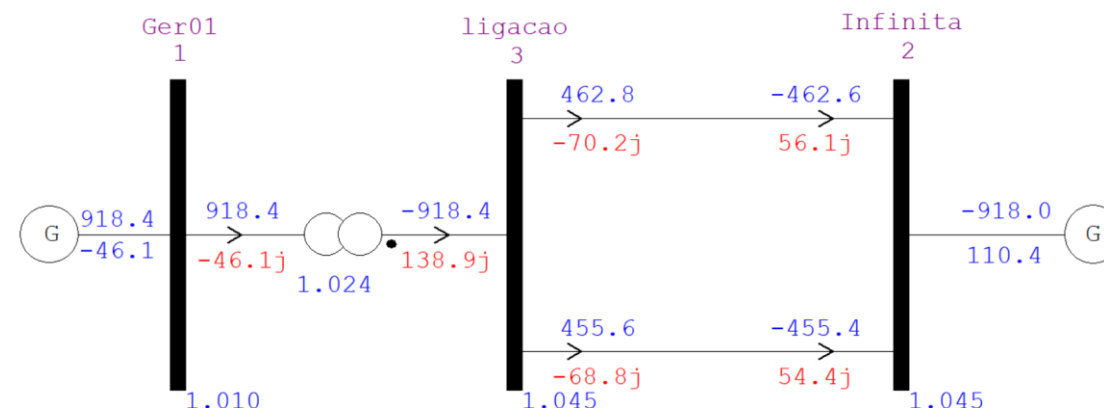


# Extra – Critério das áreas iguais



# 6. Critério das áreas iguais

- Sistema simplificado a um gerador e uma barra infinita.



	$T_c$ (ms)	Variação
Multimáquinas (Munhoz)	474	28%
Área iguais (Munhoz)	341	

# 6. Critério das áreas iguais

- Diagrama

